
Simulation numérique du plissement des tôles lors de leur transport en continu dans les usines sidérurgiques

Nicolas Jacques*** — Akli Elias**
Michel Potier-Ferry* — Hamid Zahrouni*

* Laboratoire de Physique et Mécanique des Matériaux (LPMM)
UMR CNRS 7554 Université Paul Verlaine
Ile du Saulcy, F-57045 Metz cedex 01
{jacqueni, potier-ferry, zahrouni}@lpmm.univ-metz.fr

** ARCELOR Research SA
Voie Romaine, F-57280 Maizières-lès-Metz
akli.elias@irsid.arcelor.com

RÉSUMÉ. Cet article porte sur l'étude de la formation de défauts de forme, appelés plis, lors du transport en continu de bandes métalliques. Un modèle éléments finis a été mis au point pour simuler le passage d'une bande sur un rouleau. Il nous permet de préciser les mécanismes à l'origine du plissement. La traction appliquée, afin de guider la bande, engendre l'apparition de contraintes compressives secondaires faisant flamber cette dernière. Nous avons observé que ces ondulations sont fortement accentuées lors du mouvement de la tôle. Ce phénomène est lié au frottement bande-rouleau. Dans certains cas, les plis se forment par l'action d'un mécanisme cumulatif plastique.

ABSTRACT. The development of plastic creases, called wrinkles, during sheet metal conveying in processing lines is considered. Finite element analyses are carried out to modelize wrinkling when a sheet is passing over a roll. A description of this phenomenon is proposed. When a strip is stretched, small compressive stresses occur near the roll and cause the strip buckling. Simulations have shown that friction between sheet and roll accentuates the post-buckling patterns during strip displacement. In some cases, buckles evolve to create a wrinkle by a plastic cumulative mechanism.

MOTS-CLÉS : plissement, tôles minces, transport de bandes, (post-)flambement, éléments finis.

KEYWORDS: wrinkling, sheet metal, web handling, (post-)buckling, finite element.

1. Introduction

La fabrication de produits plats en acier nécessite de nombreuses étapes. Une fois laminées les tôles doivent encore subir divers traitements (recuit, galvanisation, « coating »...) avant d'être commercialisables. Lors de ces procédés, les tôles sont soudées entre elles et se présentent sous forme d'une bande de longueur plus ou moins infinie, elles sont transportées à l'aide de nombreux rouleaux, on parle de transport en continu. Un des principaux problèmes rencontrés lors de ce transport est la formation de plis. Les plis sont des défauts de forme qui apparaissent lors du passage de la tôle sur les rouleaux. Ils se présentent sous la forme d'une ondulation plastique fortement marquée et généralement orientée selon la longueur de la tôle (figure 1). La présence de plis rend les tôles impropres à la commercialisation. La compréhension et la maîtrise de ce phénomène apparaissent comme un enjeu important pour l'industrie sidérurgique.

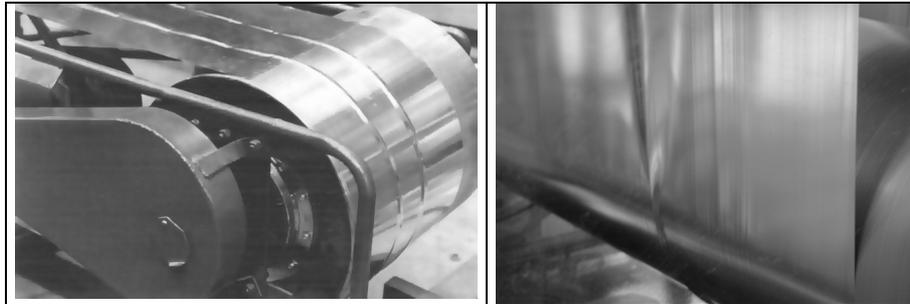


Figure 1. Photos de plis formés lors d'essais

Un phénomène précurseur au plissement est le flambement de la bande, il est dû à la traction appliquée afin de guider la bande. Les tôles étant relativement larges et minces, les tractions appliquées dans les usines sont généralement bien supérieures aux tractions critiques de flambage. Cependant, cette traction induit un effet stabilisant, l'amplitude des ondulations reste modérée, même pour des niveaux de traction nettement plus élevés que la traction critique de flambement. Ce flambement cause donc peu de contraintes supplémentaires et la limite élastique est rarement atteinte. La formation de plis ne peut donc pas être expliquée par un flambage plastique. En fait, l'action de mécanismes dissipatifs (frottement et plasticité) conduit à l'accentuation des déformées post-flambées lors du déplacement de la tôle. Les plis apparaissent lorsque le niveau de traction atteint une valeur appelée traction critique de formation des plis (TCFP) beaucoup plus élevée que la traction critique de flambement (figure 2a).

A notre connaissance, il y a assez peu de travaux publiés concernant ce phénomène. Les principales études proviennent des sidérurgistes japonais (Sasaki *et*

al., 1984 ; Matoba *et al.*, 1992 ; Kaseda *et al.*, 1994). Néanmoins ces études assez anciennes ne proposent pas une description complète des phénomènes à l'origine du plissement. Plus récemment, Valérie Gueydan (1997) a proposé une étude numérique du flambement des tôles sous traction dans les lignes de recuit continu. Ces travaux mettent en évidence que la principale cause du flambement est le profil des rouleaux utilisés dans les usines. En effet, afin d'améliorer le guidage de bande, les rouleaux ne sont pas cylindriques, mais légèrement convexes (figure 2b). Cette géométrie conduit, lors de l'application de la traction, à l'apparition de contraintes compressives secondaires, qui peuvent faire flamber la bande. Le modèle proposé par Gueydan ne simule pas le mouvement de la bande, il ne permet donc pas d'étudier la formation des plis.

Dans cet article, nous proposons des simulations numériques du passage d'une tôle, soumise à un chargement de traction, sur un rouleau. Les mécanismes à l'origine du plissement ont été identifiés et sont décrits.

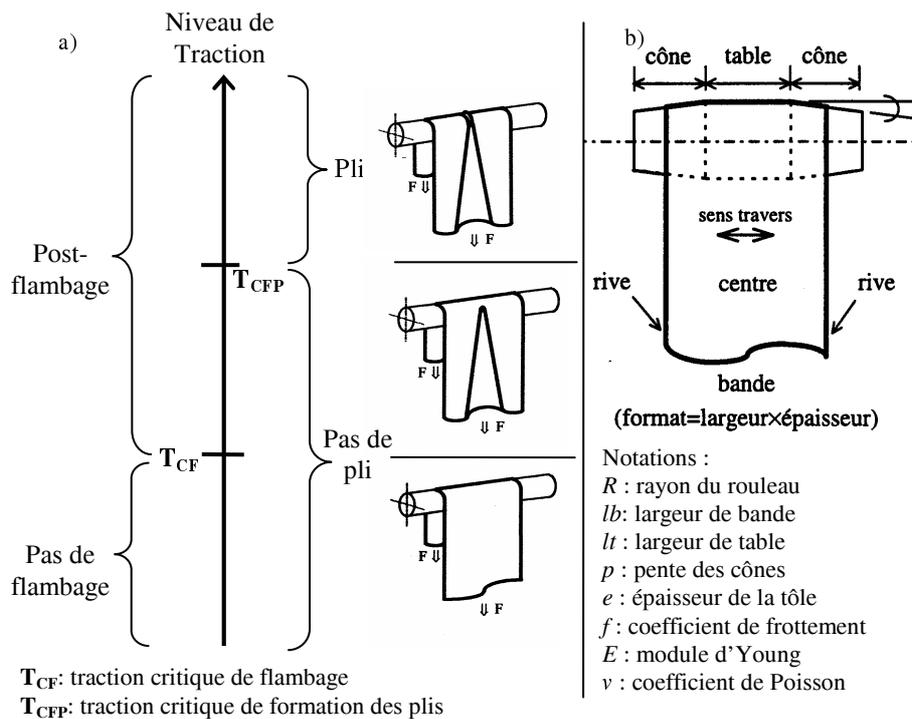


Figure 2. a) Notions de flambement et de plissement b) Illustration des profils de rouleaux coniques

2. Modélisation par éléments finis

Un modèle élément fini a été mis au point à l'aide du code commercial ABAQUS/standard. Il prend en compte un rouleau et une portion de tôle. Le rouleau est modélisé à l'aide d'une surface rigide. Dans cet article, nous avons considéré un profil de rouleau conique ; le rouleau est constitué d'une partie centrale cylindrique, appelée table, prolongée par deux cônes (figure 2b). Il s'agit d'un des profils les plus utilisés dans les usines. Notons cependant que pour certains procédés tel que le recuit continu, où la bande est chauffée et refroidie, il existe également un bombé thermique. En effet, dans ce cas, la bande peut avoir une température différente de celle de l'air ambiant, ce qui cause l'apparition d'un gradient de température dans la largeur des rouleaux transportant cette bande. Par conséquent, les déformations thermiques peuvent accentuer le profil de rouleaux. ARCELOR Research dispose d'un modèle thermo-élastique pour déterminer la forme des rouleaux dans les recuits continus (Elias *et al.*, 1999). Bien sûr, toutes les formes de rouleaux peuvent être prises en compte dans le modèle élément fini.

La tôle est modélisée avec des éléments de coques minces (S8R5), il s'agit d'éléments quadratiques à intégration réduite, prenant en compte grands déplacements et rotations, mais seulement les petites déformations. Nous utilisons une loi de comportement élasto-plastique avec écrouissage isotrope (modèle de Prandl-Reuss). Le comportement mécanique des sections des éléments de coque est déterminé par intégration numérique à travers l'épaisseur, nous utilisons le schéma de Simpson. Des tests ont montré que cinq points d'intégration dans l'épaisseur sont suffisants. Le contact unilatéral avec frottement de Coulomb est défini entre la tôle et le rouleau.

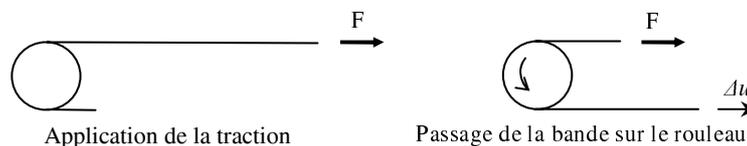


Figure 3. Les deux étapes des simulations de transport de bande

Les simulations sont réalisées en statique non linéaire. Les calculs sont effectués en deux étapes. Tout d'abord, on applique une traction à la tôle, ce qui cause le flambement de la bande. Puis on simule le déplacement de la tôle combinée à la rotation du rouleau, la traction restant constante (figure 3). Durant cette phase, on observe l'évolution des déformées post-flambées et, dans certains cas, l'apparition d'un pli. Comme le montre la figure 1, les plis ont une faible largeur par rapport à celle de la bande, il est donc nécessaire de mailler finement la partie de la tôle qui passe sur le rouleau (figure 4). Les maillages utilisés ont un nombre de degrés de liberté compris entre 60 000 et 300 000. Comme la convergence est assez lente (ceci est principalement dû au fait que les nœuds en contact avec le rouleau changent au

cours de l'enroulement), il en résulte des temps de calcul assez longs variant entre un et trois jours¹.

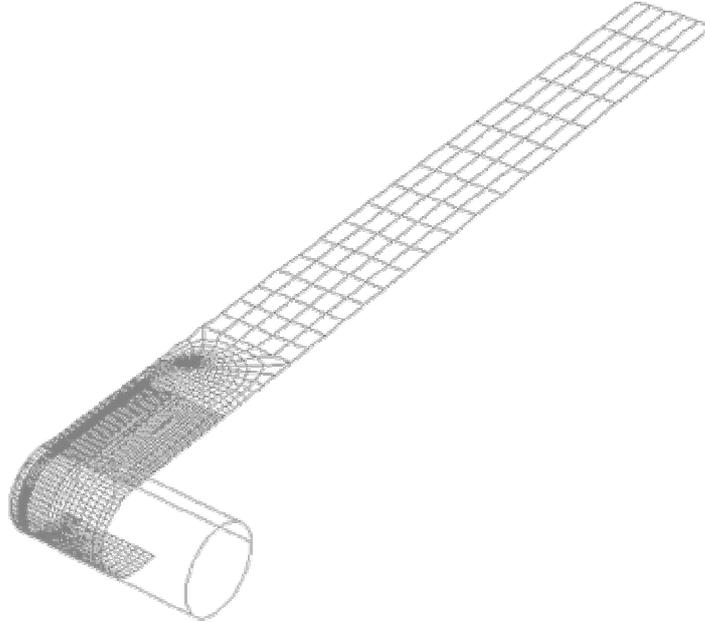


Figure 4. Un exemple de maillage utilisé. Par symétrie, seule une moitié de la bande est maillée

3. Flambement sous traction de la bande

Pour certaines structures, l'application d'un chargement de traction engendre l'apparition de contraintes compressives secondaires pouvant causer le flambement de cette structure. Un des exemples les plus connus est le test de flambage de (Yoshida *et al.*, 1981). Il s'agit d'une plaque carrée soumise à une traction selon une de ses diagonales. Plus récemment, (Friedl *et al.*, 2000) ont étudié le flambement de plaques rectangulaires dont les conditions aux limites empêchent les déplacements latéraux au niveau des côtés les plus courts. Ils montrent que, lors de l'application d'un chargement de traction selon la longueur, ces conditions aux limites conduisent à l'apparition de contraintes compressives latérales localisées près des bords. Même si l'intensité de ces contraintes est bien plus faible que les contraintes de traction, elles peuvent causer le flambement de bandes très minces.

1. ABAQUS version 6.4 fonctionnant sur station de travail HP j6700 (750 MHz).

Dans notre cas, ce phénomène est lié au profil de rouleau. Lorsque l'on applique la traction, le contact s'établit tout d'abord sur la partie cylindrique du rouleau, ce qui crée une inhomogénéité des contraintes de traction au niveau du rouleau à l'origine de contraintes compressives dans le sens travers. Ces contraintes sont localisées à proximité du rouleau (figure 5). Elles causent le flambement du brin libre (portion de tôle qui n'est pas en contact avec le rouleau). Ce flambement est localisé : loin du rouleau, où les contraintes compressives deviennent nulles, les ondulations s'estompent progressivement à cause des effets stabilisants de la rigidité de flexion et de la rigidité géométrique induite par les contraintes de traction dans le sens long.

Notons qu'à cause de ces effets stabilisants (surtout celui de la traction), l'amplitude de ces ondulations reste modérée même dans le post-flambement lointain. Pour les niveaux de tractions couramment utilisés dans les usines, la bande est généralement élastique. L'existence de phénomènes conduisant à une importante accentuation des ondulations lors du mouvement de la bande semble donc nécessaire pour expliquer la formation de plis.

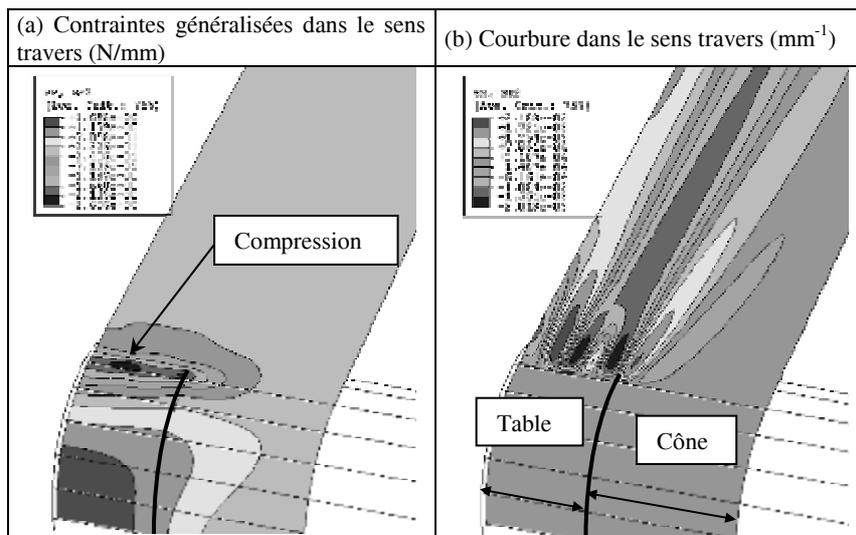


Figure 5. Flambement d'une bande sous traction en contact avec un rouleau. Comportement élastique $E = 70000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$, épaisseur $e = 0.2 \text{ mm}$, largeur de la bande $l_b = 1000 \text{ mm}$, largeur de la table $l_t = 400 \text{ mm}$, rayon du rouleau $R = 220 \text{ mm}$, pente des cônes $p = 1.33 \text{ mm/m}$, traction appliquée 18 MPa . Comme une seule moitié de la bande est maillée, l'arête à gauche des images correspond au centre de la bande

4. Evolution des ondulations de flambement lors du transport de la bande

4.1. Le frottement conduit à l'augmentation des contraintes compressives lors de l'enroulement

Un premier mécanisme conduisant à l'accentuation des ondulations de flambement est dû au frottement entre la bande et le rouleau. On constate lors de l'enroulement une importante augmentation des contraintes compressives. En fait, le flambement de la bande cause des déplacements latéraux et donc diminue légèrement la largeur de la bande. Le flambement étant localisé sur le brin libre, lorsque la bande arrive sur le rouleau, elle reprend sa largeur initiale. Il existe donc un léger glissement transversal entre la bande et le rouleau (figure 6), des efforts de frottement agissent sur la tôle. Par conséquent, des contraintes compressives supplémentaires apparaissent lors de l'enroulement.

Le niveau de ces contraintes additionnelles dépend bien sûr de la valeur du coefficient de frottement. Il est généralement plus important que celui des contraintes dues au profil de rouleau. Par exemple, pour les conditions de la figure 7, lors de l'enroulement, les contraintes compressives augmentent de 110 % lorsque le coefficient de frottement est égal à 0.3, et de 160 % lorsqu' il est égal à 0.4.

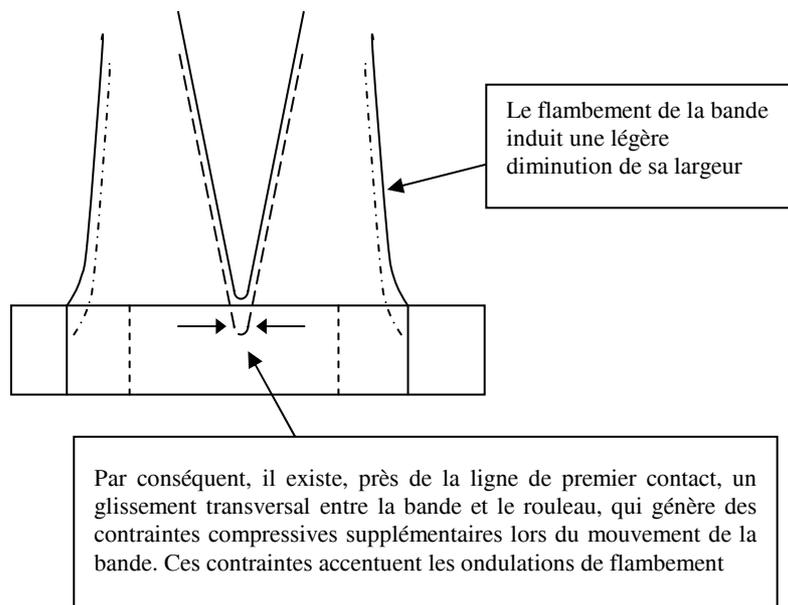


Figure 6. Illustration de l'effet du frottement lors de l'enroulement de la bande

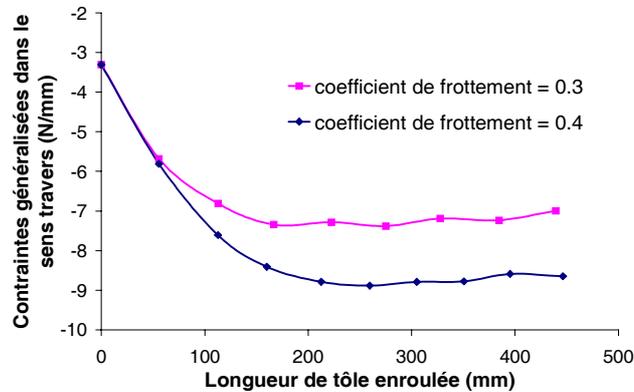


Figure 7. Augmentation des contraintes compressives dans le sens travers (valeur maximale aux points d'intégration) lors de l'enroulement d'une bande élastique pour deux valeurs du coefficient de frottement. Traction appliquée 25 MPa, autres données : cf. figure 5

4.2. Le pli se forme par l'action d'un mécanisme cumulatif plastique

L'augmentation des contraintes compressives lors de l'enroulement engendre une forte accentuation des ondulations de flambement ; la limite élastique peut être atteinte. Dans certains cas, ces déformations plastiques conduisent à la mise en œuvre d'un mécanisme cumulatif plastique : si le flambage a marqué plastiquement la tôle, des ondulations résiduelles se propagent avec le mouvement de la bande. L'enroulement de ces ondulations sur le rouleau crée des contraintes résiduelles qui accentuent le flambage en amont. Par conséquent, des ondulations plus marquées arrivent sur le rouleau, accentuant encore davantage le flambement en amont, un cycle autocatalytique se met en place. Le pli se forme progressivement sur le rouleau au fur et à mesure qu'il se propage avec le défilement de la bande.

La figure 8 montre la formation d'un pli. Les images de la première ligne montrent le flambement sous traction, à ce stade la bande est encore élastique. Après un enroulement de 74 mm, on observe la forte accentuation du flambement due à l'effet du frottement. Durant cette phase la courbure des ondulations a plus que doublé, la limite élastique est atteinte à ce moment. Ensuite, le pli se forme par l'action du mécanisme cumulatif plastique : une ondulation se propage sur le rouleau, sa courbure augmente progressivement avec le déplacement de la bande. La forme du défaut obtenu, représentée par la figure 9, correspond tout à fait aux observations de plis sur les lignes industrielles.

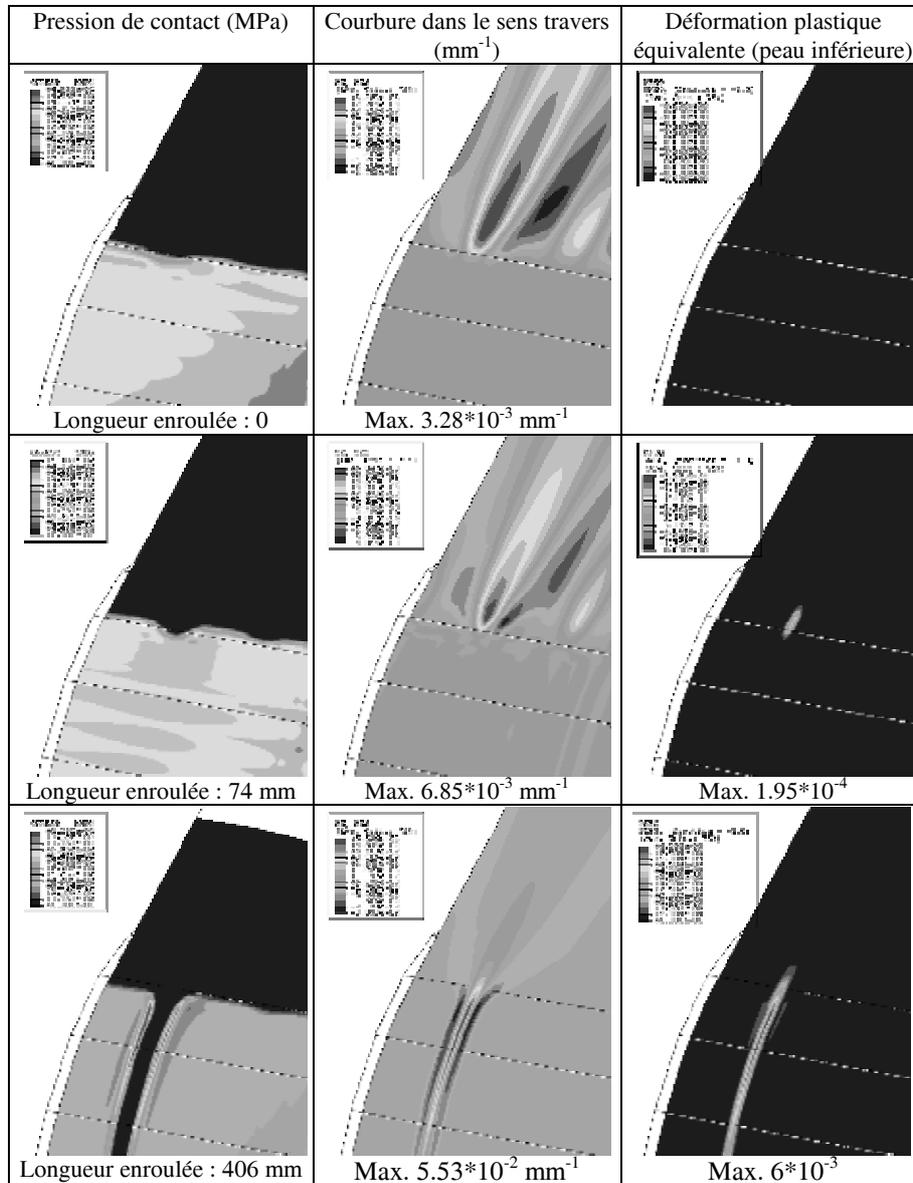


Figure 8. Formation d'un pli. Ces images montrent la portion de tôle arrivant sur le rouleau. La bande a un comportement élasto-plastique, la courbe d'écroutissage provient d'un essai de traction sur un aluminium (la limite élastique à 0.2 % est égale à 112 MPa et l'exposant d'écroutissage vaut environ 6). Coefficient de frottement $f = 0.4$, traction appliquée 30 MPa, autres données : cf. figure 5

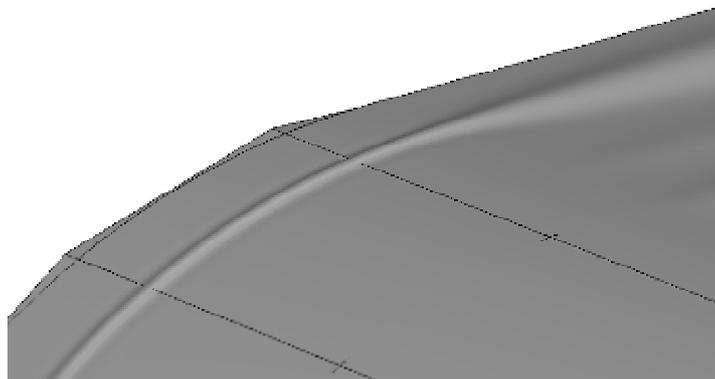


Figure 9. Aspect du pli obtenu par simulation numérique. Les données sont celles de la figure 8

5. Mécanisme cumulatif plastique et traction critique de formation des plis

Le mécanisme cumulatif plastique semble expliquer l'existence d'une traction critique de formation des plis (TCFP). La figure 10a montre l'évolution de la courbure des ondulations de flambage lors de l'enroulement pour différentes valeurs de la limite élastique. Au début, les courbes sont superposées. Durant cette phase, la tôle est élastique, l'accentuation des ondulations est due à l'augmentation des contraintes compressives (effet du frottement). Les courbes se séparent ensuite après un déplacement d'environ 150 mm. Pour les valeurs les plus importantes de la limite élastique (87.5 et 90 MPa), la courbure sature en même temps que les contraintes compressives (voir aussi la figure 7) et reste à un niveau modéré ; aucun défaut ne propage avec le défilement de la bande, on ne forme pas de pli. Pour les limites élastiques les plus faibles (≤ 85 MPa), on constate une très forte augmentation de la courbure des ondulations après la première plastification. On a atteint un niveau de déformation plastique suffisant pour « déclencher » le mécanisme cumulatif plastique². A cause de ce mécanisme, une faible variation de la limite élastique de 85 à 87.5 MPa entraîne une très forte augmentation du niveau de courbure atteint lors de l'enroulement et la formation d'un pli.

La figure 10b montre l'évolution de la courbure des ondulations lors de l'enroulement pour différents niveaux de traction. Ces courbes ont une allure assez

2. En fait, on constate qu'il ne suffit pas d'atteindre un certain niveau de déformations plastiques pour qu'un pli apparaisse. Il faut également que les ondulations de flambement soient suffisamment marquées, il semble que le « moteur » du mécanisme cumulatif plastique soit la courbure résiduelle des ondulations, qui est liée au gradient de déformation plastique dans l'épaisseur de la tôle.

similaire aux précédentes : pour les niveaux de traction les plus faibles, l'augmentation de la courbure reste modérée et plus ou moins proportionnelle à celle des contraintes compressives. Par contre, la courbure augmente très fortement au cours de l'enroulement, lorsque le niveau de traction dépasse une valeur critique, qui est ici comprise entre 25 et 27.5 MPa. Il apparaît donc que la TCFP correspond au niveau de traction engendrant l'action du mécanisme cumulatif plastique. Le modèle numérique permet donc, pour une configuration donnée, d'estimer la TCFP en réalisant plusieurs simulations d'enroulement pour différents niveaux de tractions.

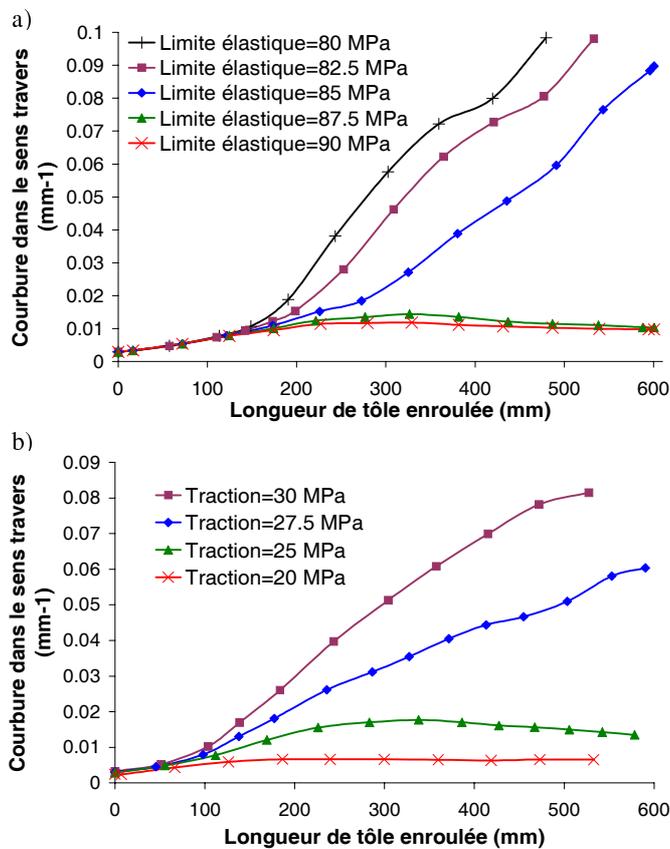


Figure 10. Evolution de la courbure dans le sens travers des ondulations (valeur maximale aux points d'intégration) lors de l'enroulement. a) pour différentes valeurs de la limite élastique (comportement parfaitement plastique avec $E = 70\,000$ MPa et $\nu = 0.3$), traction 25 MPa. b) pour différents niveaux de tractions. Dans les deux cas, les données non précisées sont identiques à celles de la figure 8

6. Conclusions

Des simulations numériques nous permettent de mieux comprendre la formation de plis lors du transport de bandes. L'application d'un chargement de traction peut causer le flambement de la tôle. Il apparaît que le frottement entre la bande et le rouleau cause une forte accentuation des ondulations de flambement lors du déplacement de la tôle. Dans certains cas, si la limite élastique est atteinte, le pli se forme par l'action d'un mécanisme cumulatif plastique. Les simulations permettent en outre d'évaluer les tractions critiques de formations des plis (TCFP) dans des conditions industrielles. Notons qu'une campagne d'essais a montré un bon accord entre les prédictions numériques de TCFP et les résultats expérimentaux. L'outil numérique apparaît donc comme une aide précieuse à la conception des lignes continues.

Pour les simulations présentées dans cet article, la principale cause du flambement est le profil des rouleaux. Pour certains procédés, le flambement peut également être dû aux défauts de planéité résultant du laminage ou à des contraintes d'origine thermique, ces paramètres peuvent également être pris en compte dans le modèle éléments finis (Jacques, 2004).

7. Bibliographie

- Elias A., Onno F., Noville G.F., Steiner D., Amélioration du guidage des bandes et étude mécanique des phénomènes de formation des plis au recuit continu, Rapport de la commission européenne EUR 18796, 1999.
- Friedl N., Rammerstorfer F.G., Fischer F.D., « Buckling of stretched strips », *Computers and Structures*, vol. 78, 2000, p. 185-190.
- Gueydan V., Modélisation numérique du flambage de bandes en acier dans les recuits continus, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz, 1997.
- Jacques N., Modélisation et étude du plissement des tôles lors de leur transport en continu dans les usines sidérurgiques, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz, 2004.
- Kaseda Y., Masui T., « Control of buckling and crossbow in strip processing lines », *Iron and Steel Engineer*, September 1994, p. 14-20.
- Matoba T., « Effect of roll crown on heat buckling and strip walk in continuous annealing lines », *CAMP ISIJ*, vol. 5, 1992, p. 1459-1462.
- Sasaki T., Yangishima F., Hira T., Shimoyama Y., Abe H., Tahara K., Control of strip buckling and snaking in continuous annealing furnace, Kawasaki Steel Technical Report n° 9, 1984, p. 36-46.
- Yoshida K., Hayashi J., Hirata M., « Yoshida buckling test », *International Deep Drawing Research Group Meeting*, Tokyo, Japan, 1981.